

# FRACTURACIÓN SINSEDIMENTARIA Y DIAGÉNESIS PRECOZ EN LAS BIOCONSTRUCCIONES DEL CÁMBRICO INFERIOR DE ALCONERA (OSSA-MORENA)

E. Vennin <sup>1</sup>, E. Moreno-Eiris <sup>2</sup>, A. Perejón <sup>2</sup> y J.J. Álvaro <sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire de Géologie, Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 Paris, Francia.*

<sup>2</sup> *UEI-Departamento de Paleontología, Instituto de Geología Económica (CSIC- UCM), Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España.*

<sup>3</sup> *UPRESA 8014 CNRS, Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq, Francia.*

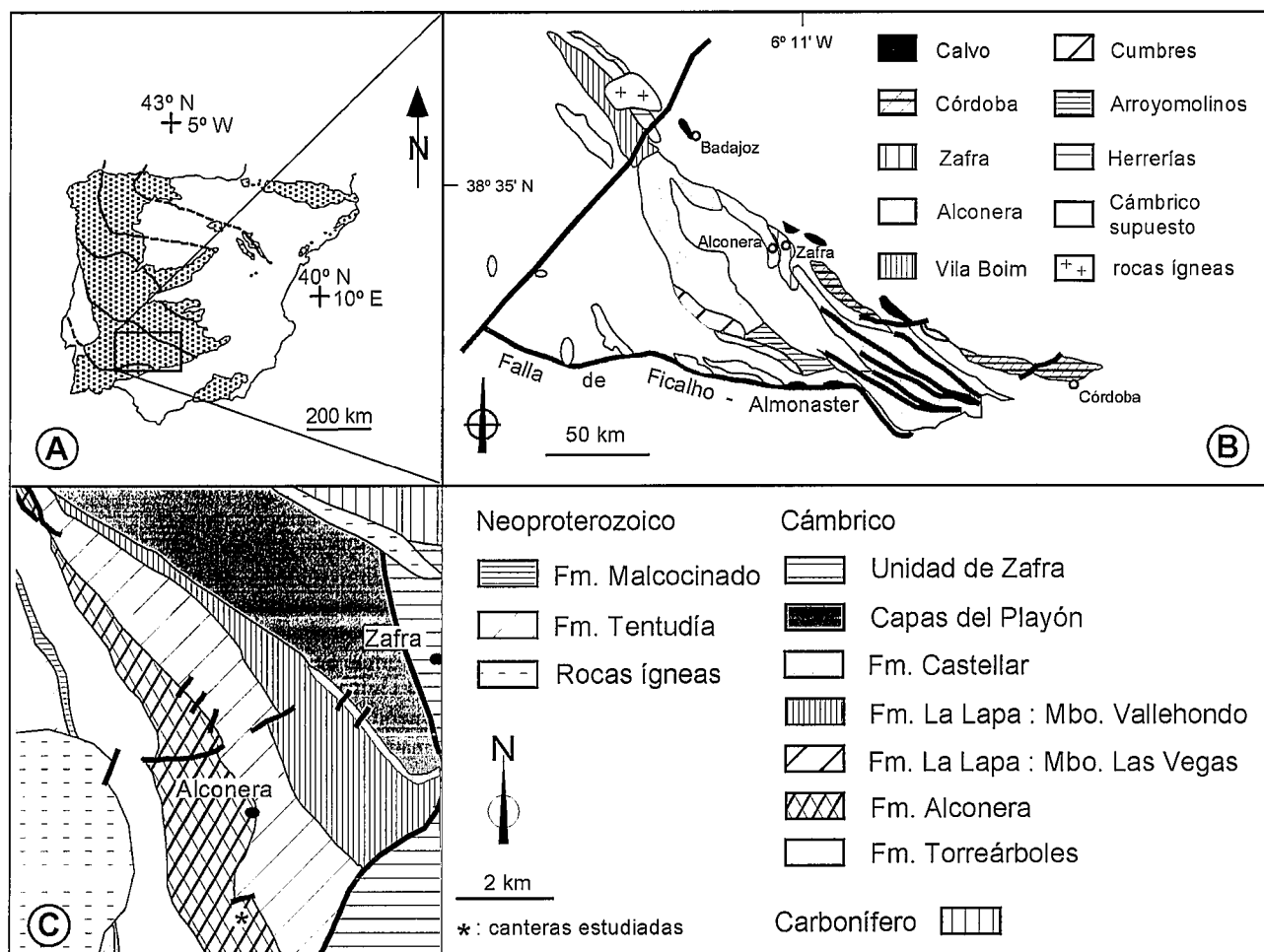
**Resumen:** Se revisan en este trabajo los procesos diagenéticos registrados en las bioconstrucciones expuestas en dos canteras de Alconera (Badajoz), pertenecientes al Miembro La Hoya (Formación Alconera), situadas en la zona de Ossa-Morena y de edad Marianiense inferior (Cámbrico Inferior). Se han diferenciado cuatro etapas sedimentarias que comprenden: (1) los primeros episodios de colonización por montículos métricos de calcimicrobios sobre un substrato lutítico-carbonatado, (2) el desarrollo de un complejo decamétrico de montículos bioconstruidos con morfología planoconvexa, caracterizados por la abundancia de estromatactis, *boundstones* con calcimicrobios y escasos arqueociatos, y flancos con estructuras de tipo *zebra*, (3) el crecimiento de montículos métricos con arqueociatos y calcimicrobios accesorios sobre un substrato mixto y (4) una sedimentación lutítica con nódulos calcáreos que reflejaría el hundimiento progresivo de la plataforma. Se reconocen siete episodios de diagénesis precoz y fracturación sinsedimentaria (de A a G). El relleno de las cavidades intra e interpartícula (A), de los estromatactis (B) y de los diques neptúnicos (C) es similar comprendiendo, en orden cronológico, matriz micrítica, alternancia de matriz micrítica y cementos fibrosos, cementos de calcita fibrosa radiaxial, calcita en mosaico drúsico, dolomita hipidiotópica y cuarzo autigénico. Además de los diques neptúnicos se distinguen otros tres tipos de fracturación asociados a taludes sinsedimentarios, una fracturación con relleno similar al descrito precedentemente, pero al que se añaden brechas de colapso de bloques ya litificados (D), y diques porfídicos básicos que intruyen posteriormente a la litificación del tramo inferior carbonatado del Miembro La Hoya (E y F), pero con anterioridad a la litificación completa de su parte superior, tal y como lo muestran los pliegues sinsedimentarios y las estructuras de deformación asociadas. Por último, los diques están afectados por estructuras de deformación dúctil y fracturas (G).

**Palabras clave:** arqueociatos, calcimicrobios, bioconstrucciones, sedimentología, diagénesis, Cámbrico Inferior, Ossa-Morena.

**Abstract:** The petrographic and diagenetic features of the Lower Cambrian (lower Marianian) build-ups of the La Hoya Member (Alconera Formation), cropping out in the Alconera quarries, are here analysed. The quarries are located in the Ossa-Morena zone (southern Spain), in which four sedimentary steps are distinguished: (i) colonization episodes represented by metre-scale, microbial mounds overlying a mixed (carbonate-shale) substrate, (ii) a sharp development of a mound complex (tens of metres thick and wide) where individual mounds have convex tops and flat bases, and are rich in stromatactis, microbial boundstones (with scarce archaeocyaths) and zebra structures on flanks, and (iii) the establishment of metre-scale, archaeocyathan mounds on (iv) another mixed substrate reflecting the progressive drowning of the platform. Seven episodes of early diagenesis and syn-sedimentary fracturation are identified. The filling of the intra- and inter-granular porosities, the stromatactis and the neptunian dykes show similar patterns: the infill consists of micritic matrix, alternances of micritic matrix and fibrous calcite, radiaxial fibrous calcite, drusy calcite mosaics, dolomite and autigenic quartz. Other syn-sedimentary fracturation characters include (i) syn-sedimentary slopes, (ii) other fractures filled additionally by collapse breccia and (iii) basic porphydic dykes. The latter ones developed after lithification of the lower part of the La Hoya Member, but previously to the complete lithification of its uppermost part, as indicated by the associated syn-sedimentary folds and deformation structures. Finally, the dykes are partially folded and fractured.

**Key words:** archaeocyaths, build-ups, calcimicrobes, sedimentology, diagenesis, Lower Cambrian, Ossa-Morena.

Vennin E., Moreno-Eiris E., Perejón A. y Álvaro J.J. (2001). Fracturación sinsedimentaria y diagénesis precoz en las bioconstrucciones del Cámbrico Inferior de Alconera (Ossa-Morena). *Rev. Soc. Geol. España*, 14 (1-2): 75-88.



**Figura 1.-** (A) Situación geológica de la canteras estudiadas en el contexto de los afloramientos pre-Mesozoicos de la Península Ibérica, (B) de las unidades tectonosedimentarias o cubetas en la zona de Ossa-Morena (modificado de Liñán y Quesada, 1990) y (C) de la unidad de Alconera.

Los montículos constituidos por arqueociatos y calcimicrobios representan las comunidades bioconstruidas más características del Cámbrico Inferior de la Península Ibérica. Los afloramientos de la zona de Ossa-Morena ofrecen unas condiciones de exposición excelentes, destacándose las canteras de Alconera (Badajoz). La explotación de éstas ha permitido reconocer la arquitectura sedimentaria de un conjunto de bioconstrucciones datadas como Marianiense inferior (Perejón, 1973, 1986; Moreno-Eiris, 1988).

El Cámbrico Inferior de Ossa-Morena conserva en sus rocas la impronta de una fase de *rifting* (Liñán y Quesada, 1990), asociada a sucesivas fases tectónicas sinsedimentarias que afectaron en gran medida a la instalación y crecimiento de las bioconstrucciones más representativas. Para caracterizar la actividad geodinámica de este sector paleogeográfico durante el Cámbrico Inferior es necesario reconocer y datar sus efectos, caso abordado en este trabajo sobre Alconera en el que se describen las relaciones entre los procesos de diagénesis precoz y fracturación sinsedimentaria. La comprensión de estos procesos permitirá precisar la geometría de los montículos y el reconocimiento de sus facies originales. Este trabajo pretende caracterizar los principa-

les procesos de diagénesis y fracturación reconocibles en dos canteras excavadas en los montículos del Cámbrico Inferior de la unidad tectonosedimentaria de Alconera (Ossa-Morena).

### Marco geológico y estratigrafía

Las bioconstrucciones objeto de este análisis se sitúan en la zona de Ossa-Morena dentro de la unidad tectonosedimentaria de Alconera (Liñán y Perejón, 1981; Liñán, 1984; Fig. 1), la cual representa una de las plataformas marinas, limitadas por accidentes tectónicos mayores, que configuraron la cuenca de Ossa-Morena (Liñán y Quesada, 1990; Álvaro *et al.*, 2000). Estratigráficamente, las canteras descritas en este trabajo se sitúan en la Formación Alconera (Liñán y Perejón, 1981), que se divide en los Miembros Sierra Gorda y La Hoya (Fig. 2). Las bioconstrucciones pertenecen al Miembro La Hoya de edad Marianiense inferior (Perejón, 1973, 1986; Moreno-Eiris, 1988; Moreno-Eiris *et al.*, 1995). Este miembro comienza por una alternancia de lutitas y calizas, sobre la que se sitúa una unidad carbonatada masiva de carácter principalmente bioconstruido, recubierta gradualmente por margas nodulosas

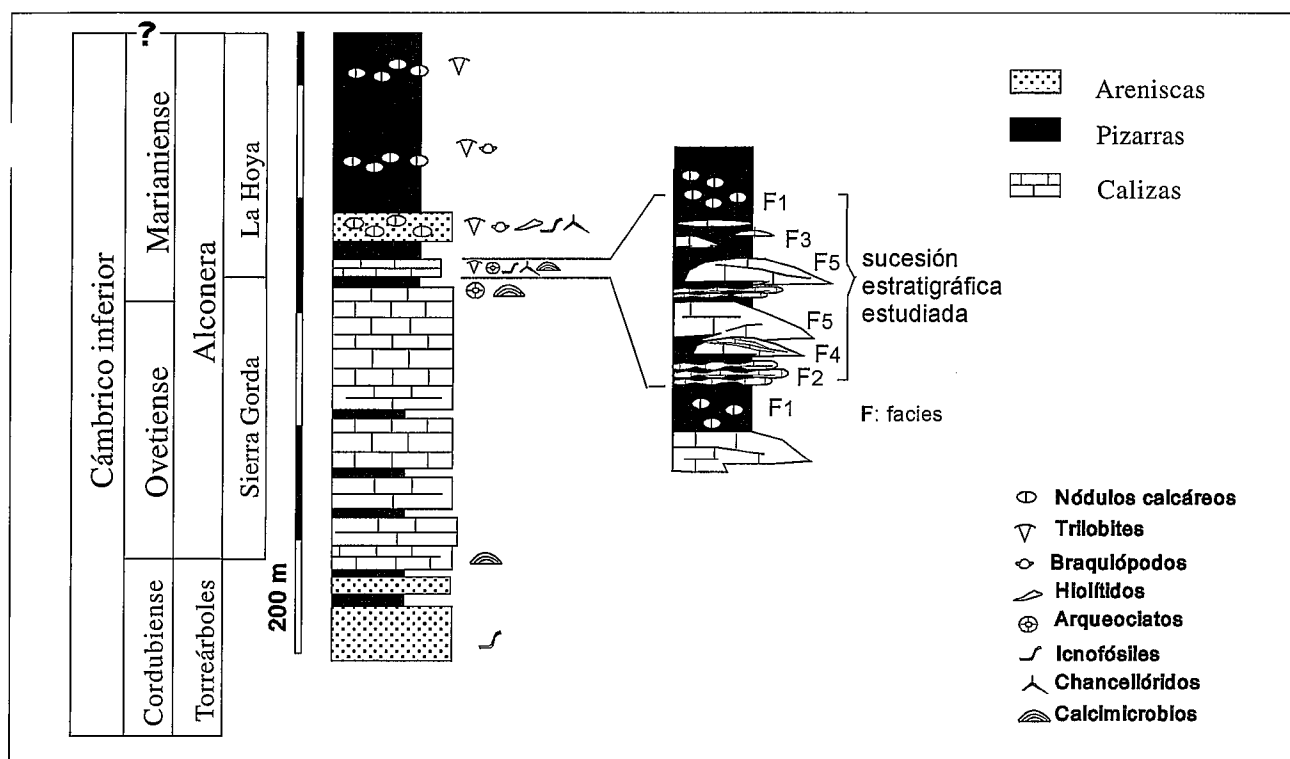


Figura 2.- Unidades estratigráficas del Cámbrico Inferior de la unidad de Alconera (modificado de Liñán y Perejón, 1981) y tipos de facies descritas en la sucesión estratigráfica estudiada.

y lutitas. El contenido fósil es abundante y presenta una alta biodiversidad (arqueociatos, calcimicrobios, trilobites, hiolítidos, braquilópodos, chancellóridos, etc.). Hasta el momento únicamente se han realizado determinaciones taxonómicas sobre los dos primeros grupos (Perejón, 1973, 1986; Moreno-Eiris, 1988; Moreno-Eiris *et al.*, 1995).

Los montículos estudiados afloran en los alrededores de la localidad de Alconera, donde se sitúa una serie de canteras actualmente inactivas de las que se extrajeron bloques calcáreos (mármol tipo «serrancolín»). Dos canteras existentes han sido seleccionadas en este estudio, denominadas A<sub>1A</sub> y A<sub>1B</sub> por Perejón (1973), debido a la complejidad de sus fases diagenéticas. En los trabajos citados previamente se ha realizado una descripción detallada de la lito y bioestratigrafía de estas canteras, cuya asociación de arqueociatos caracteriza la Zona IX de Perejón (1986). Dicha asociación está formada por *Nocheroicyathus*, *Rotundocyathus*, *Taylorcyathus*, *Rasetticyathus*, *Erismacoscinus*, *Mennericyathus*, *Alconeracyathus*, *Protopharetra* y *Chouberticyathus* (Perejón, 1973 y 1986; Moreno-Eiris, 1988; Moreno-Eiris *et al.*, 1995).

### Análisis de facies y geometría de los montículos

El Miembro La Hoya presenta en ambas canteras dos facies no bioconstruidas (F1 y F2) y tres bioconstruidas (F3 a F5) que forman la estructura de los montículos. Éstas se resumen en la Tabla I y se describen someramente a continuación.

#### F1. Lutitas con nódulos calcáreos

Los nódulos incluidos en lutitas presentan una microfacies de *mudstones-wackestones* bioclásticos (no bioconstruidos) y poseen un alto contenido en siliciclásticos, principalmente cuarzo y micas de tamaño limo. Los nódulos centimétricos se disponen subparalelos a la estratificación y contienen fragmentos de trilobites, espículas de esponjas y escasos cálices de arqueociatos. Esta facies se observa tanto en la base como en el techo del Miembro La Hoya, donde la componente carbonatada desaparece progresivamente hacia arriba hasta constituir lutitas homogéneas.

#### F2. Calcilutitas nodulosas

Los carbonatos forman cuerpos lenticulares nodulosos superpuestos, de escala centimétrica, compuestos por *mudstones* y *wackestones* bioclásticos en los que predominan los restos aislados de arqueociatos. Esta facies fue denominada de tipo *kramenzel* por Simon (1939) y en la sucesión estudiada se encuentran en la base, a techo y lateralmente a los montículos.

#### F3. Calizas lenticulares inmersas en lutitas

Esta facies aflora en la parte superior del miembro y marca la transición progresiva hacia la facies lutítica con nódulos calcáreos (F1). Las calizas configuran lenticulas bioconstruidas, decimétricas a métricas. Están constituidas por *wackestones* bioclásticos y *boundsto-*

		Litología	Facies calcáreas	Matriz	Bioclastos y calcimicrobios	Diagénesis precoz
Miembro La Hoya (canteras A1A y A1B)	Calizas no bioconstruidas	<b>F1</b> Lutitas con nódulos calcáreos	<i>mudstones-wackestones</i>	micrita (terrágenos: granos de cuarzo)	chancellóridos espículas trilobites hiolítidos arqueociatos	cavidades intra e interpartículas con cristales fibrosos y en mosaico
		<b>F2</b> Calcilutitas	<i>mudstones</i>	micrita	espículas, trilobites, arqueos.	
	Calizas bioconstruidas	<b>F3</b> Calizas lenticulares inmersas en lutitas	<i>wackestones boundstones</i>	micrita (terrágenos: granos de cuarzo)	arqueociatos chancellóridos espículas trilobites hiolítidos	cavidades intrapartículas con relleno de cristales fibrosos y en mosaico, y cuarzo
		<b>F4</b> Alternancias nodulares de caliza y lutita	<i>boundstones</i> con calcimicrobios y estromatactis (mm a cm)	micrita (terrágenos: granos de cuarzo y mica)	<i>Epiphyton</i> (arqueociatos)	estromatactis mm rellenos de micrita y cementos fibrosos y en mosaico
		<b>F5</b> Calizas masivas	<i>boundstones</i> con arqueociatos y calcimicrobios	micrita (terrágenos: granos de cuarzo)	arqueociatos <i>Epiphyton</i>	cavidades geopetales estromatactis ("zebra") con matriz micrítica, cristales fibrosos y en mosaico, y cuarzo
			<i>boundstones</i> con calcimicrobios, arqueociatos y estromatactis (cm a dm)	micrita (terrágenos: granos de cuarzo)	<i>Epiphyton</i> arqueociatos	estromatactis cm a dm rellenos de micrita y cementos fibrosos y en mosaico

**Tabla I.-** Caracterización de las facies y de los procesos de diagénesis precoz en el Miembro La Hoya (canteras A<sub>1A</sub> y A<sub>1B</sub>)

nes de arqueociatos y (accesoriamente) calcimicrobios. Los *wackestones* contienen arqueociatos, chancellóridos y escasos hiolítidos y trilobites. En los *boundstones* predominan los arqueociatos, cuyas estructuras geopetales indican su conservación en posición de crecimiento. Los arqueociatos están inmersos en una matriz micrítica y localmente incrustados por calcimicrobios de tipo *Renalcis* y *Epiphyton*, cuya textura aparece intensamente recrystalizada. En los *boundstones* abundan las cavidades intrapartículas, actualmente cementadas, y algunos estromatactis.

#### F4. Alternancias nodulares de caliza y lutita

Esta facies fue definida como "estilolaminada" por Logan y Semeniuk (1976). Moreno-Eiris (1988) la localiza en la base del complejo bioconstruido. Las lutitas se concentran en niveles estilolíticos confirmando a

la roca un aspecto laminado. Según Moreno-Eiris (1988) esta facies ha sufrido intensamente los procesos de compactación y presión-disolución. La facies carbonatada se reconoce en nódulos centimétricos, compuestos por *wackestones* bioclásticos, y en lenticulas bioconstruidas decimétricas donde dominan los calcimicrobios, los estromatactis y accesoriamente los arqueociatos.

#### F5. Calizas masivas

La caliza masiva constituye el núcleo de los montículos bioconstruidos expuestos en ambas canteras. Está compuesta por *wackestones* bioclásticos, *boundstones* de calcimicrobios, arqueociatos y estromatactis en la parte central de los montículos, *boundstones* de calcimicrobios y arqueociatos, y estructuras de tipo *zebra* en los flancos. Los calcimicrobios corresponden en su

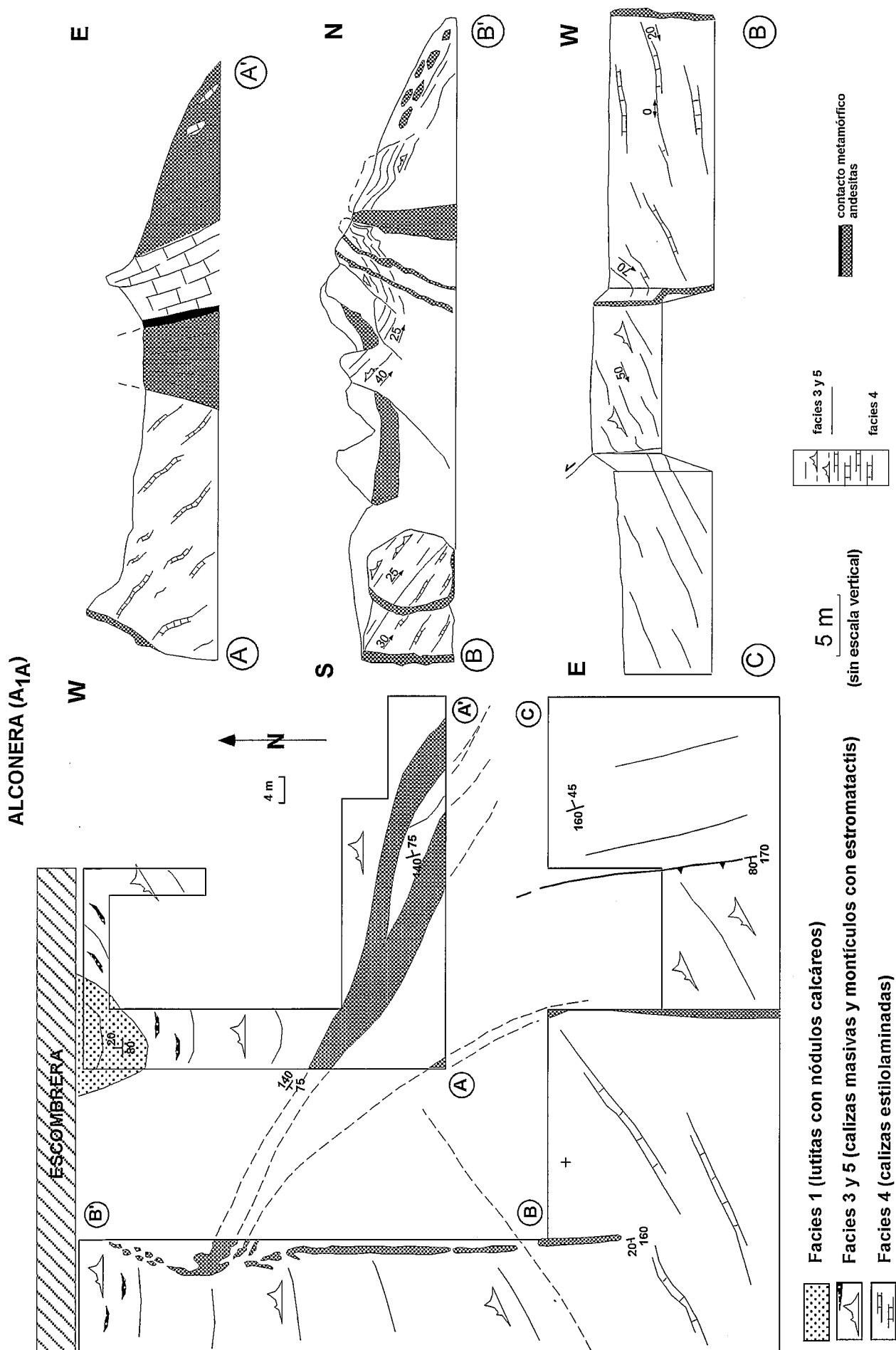


Figura 3.- Secciones transversales y longitudinales de la cantera A<sub>1B</sub> de Alconera.

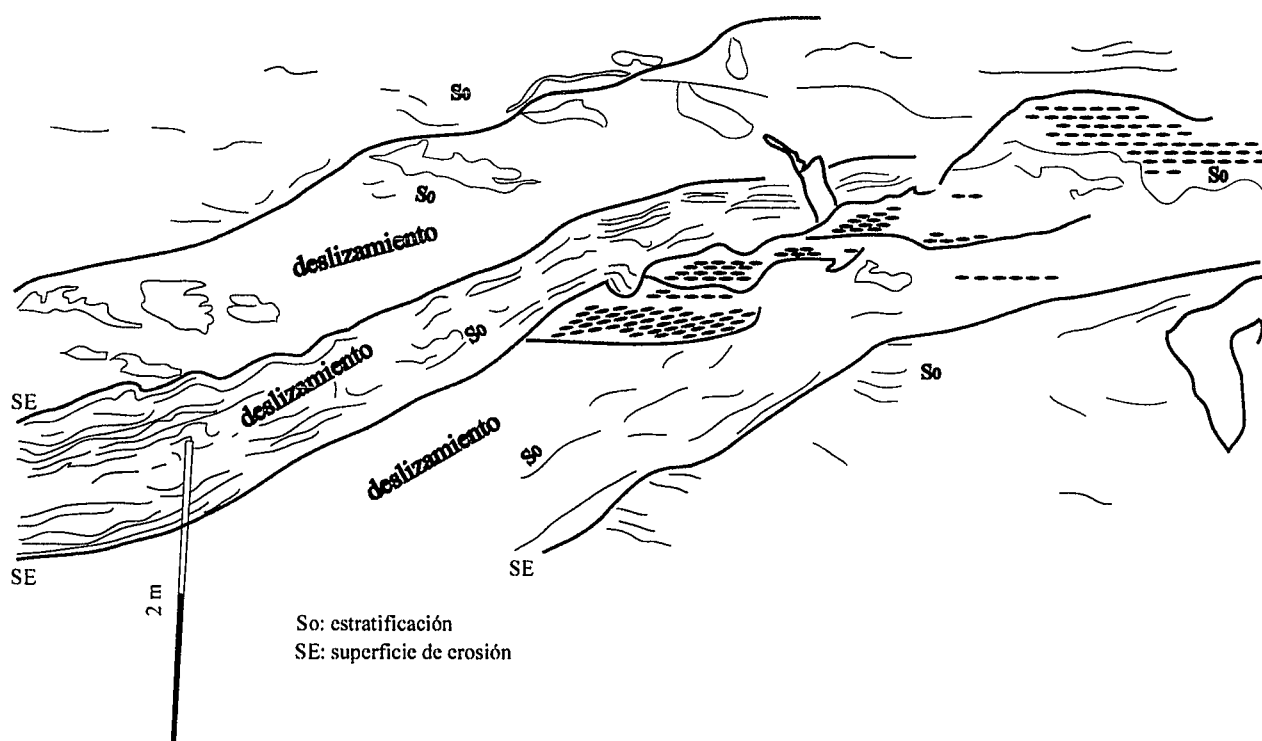


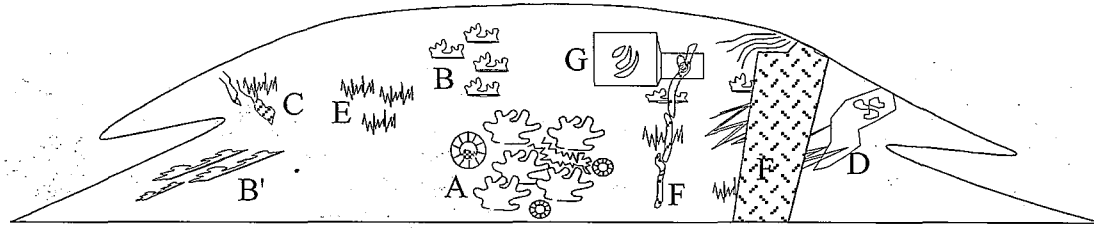
Figura 4.- Estructuras sinsedimentarias de deslizamiento divididas en tres fases de inestabilidad. Cantera A<sub>1b</sub>.

mayoría a *Epiphyton* e incrustan los cálices de arqueociatos. La textura originada por los calcimicrobios ha experimentado una fuerte recrystalización. Abundan las cavidades entre las que se distinguen la porosidad intra e interpartícula, así como los estromatactis de dimensión variable siempre rellenos por una compleja sucesión de matriz y cementos.

Los montículos y sus facies asociadas se observan en las paredes de corte de las canteras (Fig. 3), lo que permite establecer sus relaciones geométricas tanto verticales como laterales. De las observaciones realizadas en las canteras pueden deducirse cuatro etapas sedimentarias caracterizadas, respectivamente, por su tipo de facies dominante:

#### Primera etapa

Se establece una sedimentación episódica lutítico/carbonatada durante la que se instalan las primeras bioconstrucciones de calcimicrobios. Predomina la facies F4 cuyo aspecto actual está acentuado por la compactación diferencial que le confiere un aspecto estilolaminado. La sedimentación inicial consistiría en una alternancia rítmica de carbonato (pulsos de alta productividad carbonatada) y lutita (decantación terrígena). Las calizas consisten en *wackestones* y *boundstones*: los *wackestones* bioclásticos se sitúan lateralmente a algunas lenticulas bioconstruidas, de tamaño decimétrico,



Episodios diagenéticos y de fracturación en los montículos	Dimensiones	Tipos de relleno (cronología relativa)	Texturas
(A) * Crecimiento de montículos (Tab.1) dominados por calcimicrobios y arqueociatos * Cavidades intra e interpartículas * Deslizamiento por pendientes sinsedimentarias	mm a cm m a pluri-m	(1) Matriz micrítica (2) Alternancia de matriz micrítica y cementos fibrosos	(1) microsparita: 0,025 mm (2) cristales: 0,25-0,5 mm
(B) Cavidades estromatactis y (B') zebra (flancos de los montículos)	cm a dm (zebra : m)	(3) Cemento fibroso (4) Cemento en mosaico (drúsico) a poiquilítico (5) Cemento dolomítico (6) Cemento de cuarzo autigénico	(3) 0,3-0,4 mm (4) 0,5-1 mm (5) 0,15-0,25 mm (6) cristales idiomorfos: 0,05-0,25 mm
(C) Diques neptúnicos	cm a dm		
(D) Otras fracturas	m a pluri-m	Relleno de las fases (3) a (6) (7) Cementos fibrosos y en mosaico (8) Brecha de colapso (9) Lutita roja	(7) 0,3-0,4 mm (8) cantos angulosos cm a dm (9) -
(E) Estilolitos paralelos a la estratificación		(10) Lutita roja y cementos en mosaico y dolomíticos	
(F) Diques porfidicos básicos (metamorfismo de contacto)	m a pluri-m	(11) Metamorfismo de contacto afectando a los cementos calcíticos, dolomíticos y a la lutita roja situada en contacto con los diques	
(G) Deformaciones y fracturas afectando los diques		(12) Cementos en mosaico (13) Cementos dolomíticos	(12) 0,5 mm (13) cristales idiomorfos: 0,5-1 mm

Tabla II.- Episodios diagenéticos y de fracturación (de A a G) en el Miembro La Hoya (canteras A<sub>1A</sub> y A<sub>1B</sub>) y sus 13 tipos de relleno.

compuestas por *boundstones* de calcimicrobios que conservan actualmente una morfología planoconvexa acentuada por efecto de la compactación diferencial.

### Segunda etapa

Un complejo bioconstruido recubre bruscamente los sedimentos de la fase anterior, reflejándose en afloramiento por un contacto neto sobre el que se desarrolla la facies F5. Los cortes en las canteras permiten observar la geometría del complejo bioconstruido, como ocurre en la sección B-B' de la Figura 3. La geometría interna de este complejo fue descrita por Moreno-Eiris (1988) como una morfología planoconvexa, de espesor decamétrico. En particular, el núcleo se caracteriza por la abundancia de estromatactis y facies de *boundstones* con calcimicrobios y, en menor proporción, arqueociatos. En sus flancos se observan *boundstones* con estructuras tipo *zebra* alternando con *wackestones* bioclásticos.

El complejo bioconstruido carece de estructuras y texturas de alta energía persistente: abunda la matriz micrítica y los organismos bioconstructores están conservados en posición de crecimiento, predominando la función de atrape (*binding*) realizada por los calcimicrobios sobre la filtrante (*baffling*) de los arqueociatos. Estos caracteres permiten presumir una profundidad por debajo de la acción del oleaje, aunque la acción de las tormentas ha dejado su impronta episódicamente en los flancos (medio de *offshore*), marcada por la presencia de bioacumulaciones dispersas de espesor centimétrico y base erosiva. A techo del complejo bioconstruido no se han reconocido los procesos de carstificación sinsedimentaria citados en trabajos previos (Moreno-Eiris, 1988).

### Tercera etapa

Se reconoce a techo de la anterior con un contacto gradual marcado por la aparición progresiva de calcilutitas nodulosas y lenticulas calcáreas bioconstruidas intercaladas con lutitas, que pasan gradualmente a lutitas con nódulos calcáreos (facies F2 y F3). Se encuentran pequeños montículos métricos cuyo tamaño disminuye hacia techo en relación con el aumento progresivo de las intercalaciones lutíticas. En los montículos predominan los arqueociatos sobre los calcimicrobios. Las lenticulas bioconstruidas desaparecen hacia techo siendo reemplazadas por una facies de *wackestones* inmersa en lutitas.

### Cuarta etapa

Las lutitas con nódulos calcáreos (F1) que recubren la etapa anterior reflejan la desaparición gradual de la producción carbonatada. La profundización registrada a techo del Miembro La Hoya se ha reconocido en las canteras A<sub>1A</sub>, A<sub>1B</sub> y A<sub>2</sub> (Moreno-Eiris, 1988). Sin embargo, la falta de afloramientos entre ellas impide determinar si este hundimiento se debió a efectos tectónicos regionales (*tectonic drowning*) o a una transgresión mayor generalizada durante el Marianiense inferior.

## Episodios diagenéticos y de fracturación

En los episodios descritos a continuación, de acuerdo con su orden cronológico, se hace hincapié en los tipos de porosidad (primaria y secundaria) independientemente de sus rellenos (Tabla II). En el estudio de las canteras A<sub>1A</sub> y A<sub>1B</sub> se han individualizado siete episodios de diagénesis y fracturación mayores (ordenadas de A a G). Los tres primeros, caracterizados por el mismo tipo de relleno, se desarrollaron durante el crecimiento de los montículos, situándose en las cavidades intra e interpartículas y las estructuras de deslizamiento por paleopendientes (episodio A), las cavidades estromatactis y de tipo *zebra* (B) y los diques neptúnicos (C). Por otra parte, se distinguen tres tipos diferentes de fracturación que incluyen los diques neptúnicos (C), las fracturas s.s. (D) y los diques básicos porfídicos (F y G). El episodio E representa los procesos de compactación.

### Episodio A

Las cavidades intra e interpartículas son frecuentes en las facies bioconstruidas. Su distribución con respecto al esqueleto bioclástico aporta información acerca de la posición de crecimiento de los organismos bioconstructores y de los procesos energéticos que removilizaron el sedimento. Las cavidades intrapartículas se sitúan en su mayoría en los cálices de los arqueociatos. Las cavidades interpartículas (interbioclásticas) abundan en torno a las estructuras arborescentes de los calcimicrobios tipo *Epiphyton*.

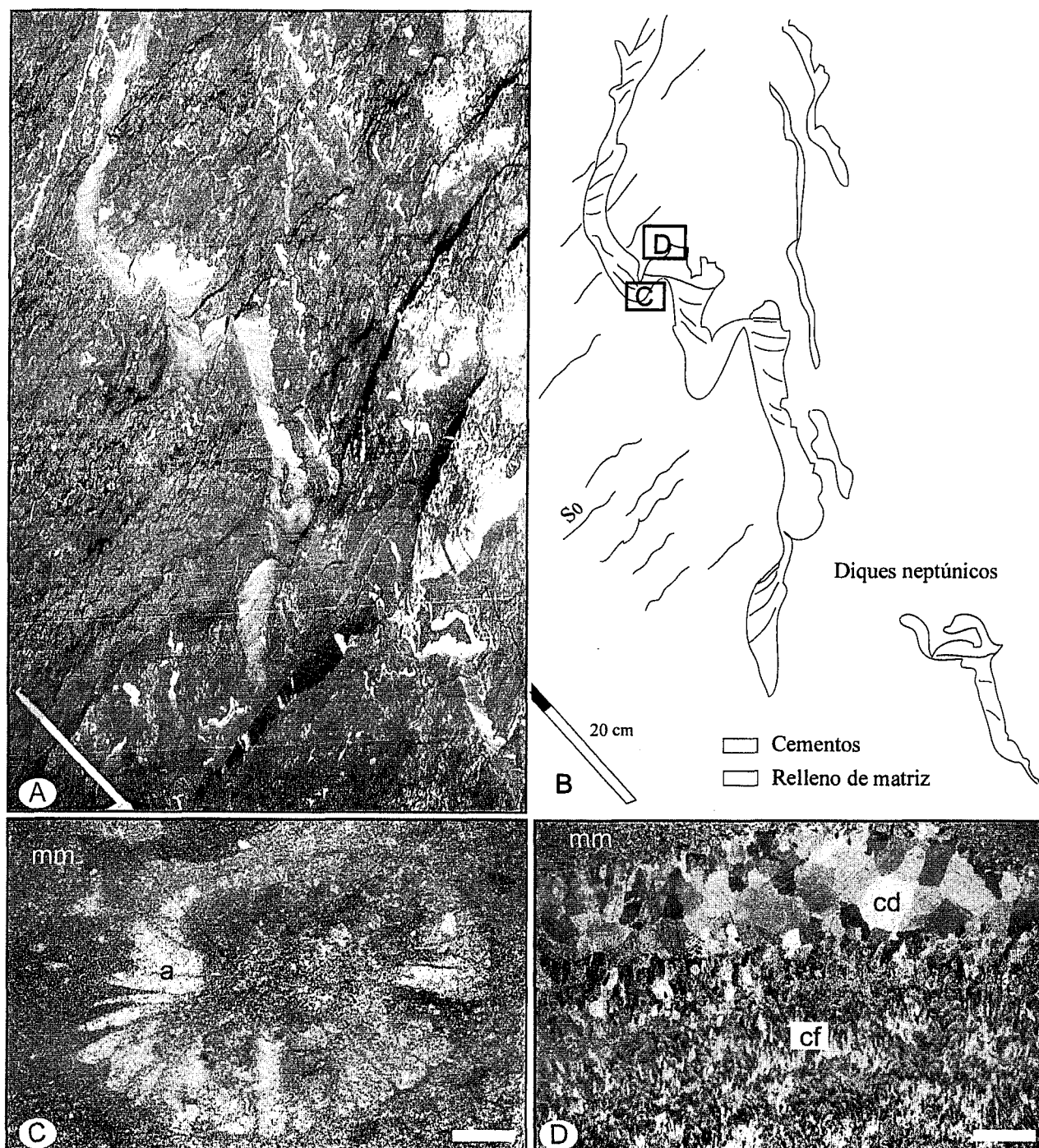
Localmente se reconoce una sucesión de estructuras tipo *slump* y brechas, cuyas superficies erosivas indican un deslizamiento episódico de sedimento a favor de paleopendientes (Fig. 4). Se trata de procesos sinsedimentarios que afectaron a un material no totalmente litificado localizado en los flancos de los montículos (cantera A<sub>1B</sub>). Se han identificado varios pulsos de deslizamiento alternando con fases de estabilización, cuya ritmicidad aparece delimitada por superficies erosivas. Estos procesos son contemporáneos con el crecimiento de los montículos.

### Episodio B

Las cavidades estromatactis (*sensu* Bourque y Cignac, 1983) aparecen en la parte masiva de los montículos (facies F5). Se trata de cavidades de base plana y techo irregular que alcanzan su mayor tamaño (10 cm de anchura) en las zonas ricas en matriz micrítica. Existe una relación inversa entre la abundancia de calcimicrobios y el tamaño de las cavidades: a mayor densidad de calcimicrobios corresponde un tamaño menor de cavidades.

El origen de estos estromatactis es complejo ya que resultan de la cementación centrípeta de una cavidad o de un sistema de cavidades. Las hipótesis más relevantes sobre el origen de los estromatactis en los montículos de Alconera son las siguientes:





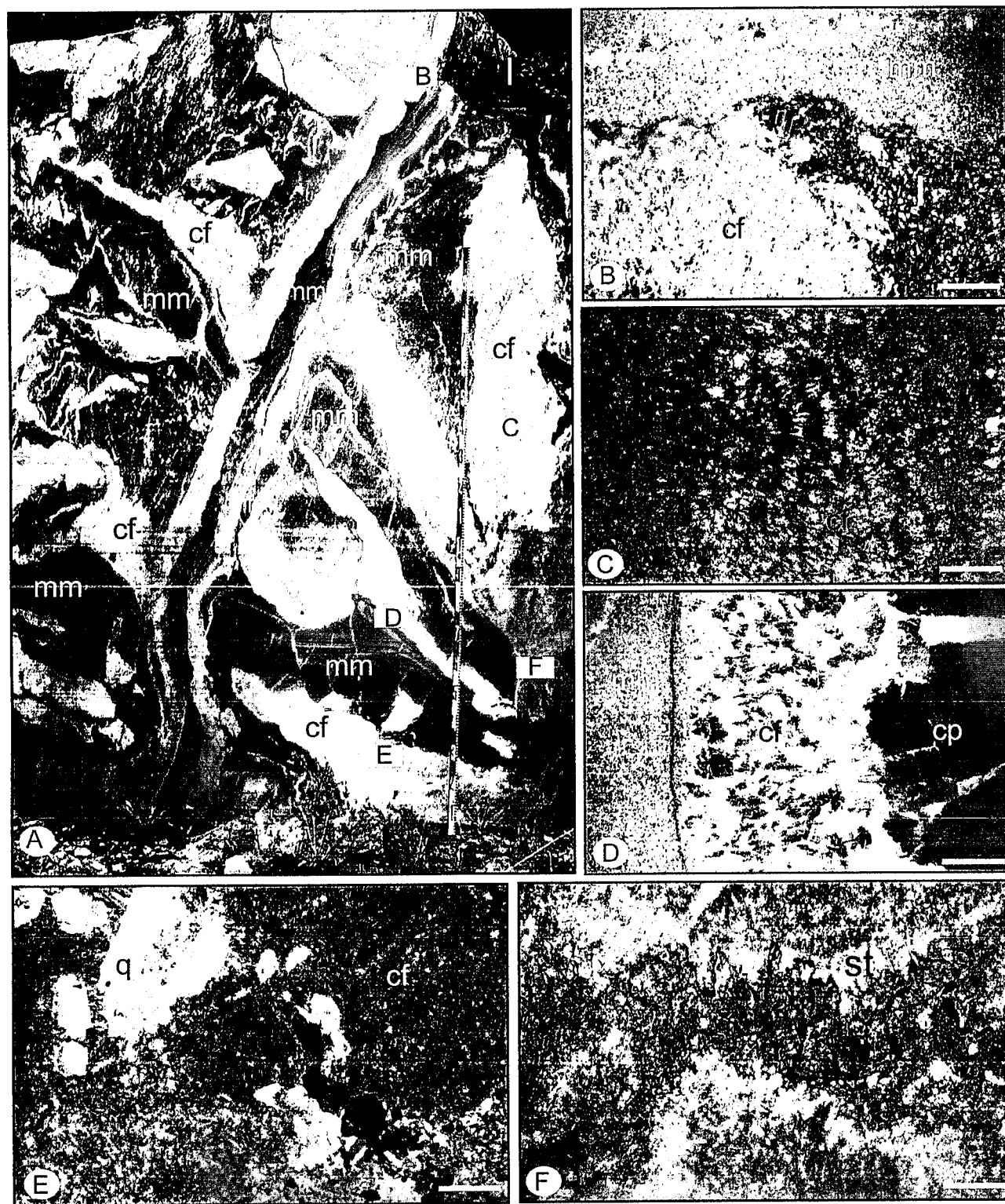
**Figura 5.-** (A) Dique neptúnico situado en la cantera A<sub>1b</sub> y (B) esquema del mismo; la laminación interna observada en la matriz de relleno indica su polaridad original. (C) Matriz micrítica (mm) con arqueociatos (a) correspondiente a la facies bioconstruida (F5, cantera A<sub>1b</sub>); escala de 500 µm. (D) Relleno de porosidad residual en el dique por cementos fibrosos (cf), cementos en mosaico drúsico (cd) y matriz micrítica (mm) en contacto con el sedimento del montículo; escala de 500 µm.

(a) El techo de algunas cavidades está limitado por organismos (arqueociatos o calcimicrobios), pero éstas se prolongan verticalmente contorneando los bioclastos. Estas cavidades podrían estar asociadas a procesos de escape de fluidos (Monty, 1995), ya que la migración de éstos suele verse favorecida por la descomposición de materia orgánica de origen microbiano (Di Salvo, 1973).

(b) No obstante, la descomposición orgánica (microbiana) y el colapso parcial del sedimento suprayacente (Lees, 1988; Lees y Miller, 1985) podrían explicar por sí

solas el origen de las cavidades desarrolladas en los montículos donde predominan los calcimicrobios.

Por otro lado, las estructuras tipo *zebra* (Fischer, 1964) o *zebra stromatactis* (Ross *et al.*, 1975) se diferencian de los estromatactis por su morfología alargada, alcanzando los 60 cm de anchura. Estas estructuras se sitúan subparalelas a los planos de estratificación y abundan en los flancos de los montículos, donde se asocian a los estromatactis. Pratt (1982) relaciona la morfología laminada de las cavidades (*zebra limestones*) a



**Figura 6.-** (A) Fracturación polifásica de los montículos y su relleno complejo. (B a F) Ilustración del relleno, los cementos y la disolución afectando las fracturas; escalas de 500  $\mu\text{m}$ : (B) Contacto entre la matriz micrítica de relleno (mm), los cementos fibrosos de las paredes de la fractura principal (cf) y la lutita roja (l). (C) Varias fases de crecimiento de los cementos fibrosos (cf). (D) Contacto entre la matriz micrítica laminada (mm) del relleno de la fractura, los cementos fibrosos (cf) y los cementos poikilíticos relleno la porosidad residual de las paredes de la fractura (cp). (E) Cemento de cuarzo autigénico (q) reemplazando los cementos fibrosos de las paredes de la fractura. (F) Estilolitos marcados por la concentración de óxidos de hierro afectando los cementos fibrosos de las fracturas (cantera A<sub>1b</sub>).

una baja turbulencia del medio de depósito en montículos de escaso relieve. Estas estructuras abundan en algunos montículos devónicos (Monty y Van Lear, 1988; Boulvain, 1993) donde se asocian a *slump* o *sheet cracks* (Bourque y Boulvain, 1993). En la cantera A<sub>1b</sub> los *zebras* aparecen predominantemente concentrados en

las estructuras de deslizamiento asociadas a paleopendientes, indicando la generación de una apertura del sedimento (porosidad secundaria) generada por la fracturación. El relleno de esta porosidad configura las estructuras denominadas *zebra*, alineadas según las paleopendientes de deslizamiento.

### Episodio C

Los diques neptúnicos se sitúan en los flancos o próximos al techo de los montículos (Figs. 5A y 5B). La profundidad de las fracturas no supera los 70 cm y su anchura media es de 2 a 10 cm. Su relleno sinsedimentario es idéntico al de las cavidades descritas previamente. Se han identificado numerosos diques de este tipo en depósitos devónicos (Playford, 1984) y carboníferos (Bridges y Chapman, 1988), siendo interpretados como resultado de procesos de apertura mecánica del sedimento por deslizamiento de pendiente o sobrecarga. El relleno marino y la posición de los diques en los montículos de Alconera permite constatar un origen similar.

### Tipos de relleno en los episodios A, B y C

Las cavidades y los diques neptúnicos presentan el mismo tipo de relleno sinsedimentario. En estas estructuras se reconocen, por orden cronológico:

(1) Una matriz micrítica idéntica al sedimento de los montículos. Ésta se dispone paralela u oblicua al plano de estratificación y permite subrayar la paleopendiente de los montículos. La matriz muestra una gradación a microesparita y alcanza localmente el tamaño de pseudoesparita (250  $\mu\text{m}$ ).

(2) Alternancia de matriz micrítica y cementos fibrosos (300-400  $\mu\text{m}$  de longitud), abundante en los diques neptúnicos (Figs. 5C y 5D). La mayoría de las cavidades de los episodios A y B carecen de esta alternancia, ya que fueron colmatadas por matriz micrítica y fluidos saturados en carbonato cálcico. Los cementos de calcita fibrosa prismática están recrystalizados localmente, alcanzando el tamaño de pseudoesparita (500  $\mu\text{m}$ ).

(3) Cemento de calcita fibrosa radiaxial, frecuentemente recrystalizada a pseudoesparita. Se reconocen varias fases de cementación con relleno centrípeto de las cavidades.

(4) Cementos en mosaico drúsico, de tamaño esparita (0,5-1 mm), que ocupan la porosidad residual de las cavidades geopetales reconocidas en los diques neptúnicos. Localmente, los cristales de calcita adoptan una textura poiquilítica.

(5) La dolomita caracteriza la última fase de relleno de las cavidades, reconociéndose en afloramiento por su color amarillo. Presenta una textura en mosaico hipidiotópico, cuyos cristales varían entre 20 y 250  $\mu\text{m}$ .

(6) Los cristales de cuarzo autigénico (50-250  $\mu\text{m}$ ) son idiomorfos, carecen de inclusiones y actúan excepcionalmente como última fase de cementación en las cavidades. Localmente poseen inclusiones de carbonato, aparecen dispersos en la matriz y reemplazan a los cementos de las paredes de cavidades y diques (Fig. 6E).

### Episodio D

Las fracturas que cortan los montículos alcanzan varios metros de profundidad (hasta 6 m visibles en afloramiento), una anchura máxima de 4 m (Fig. 6A) y afectan a todas las estructuras descritas previamente (episodios A a

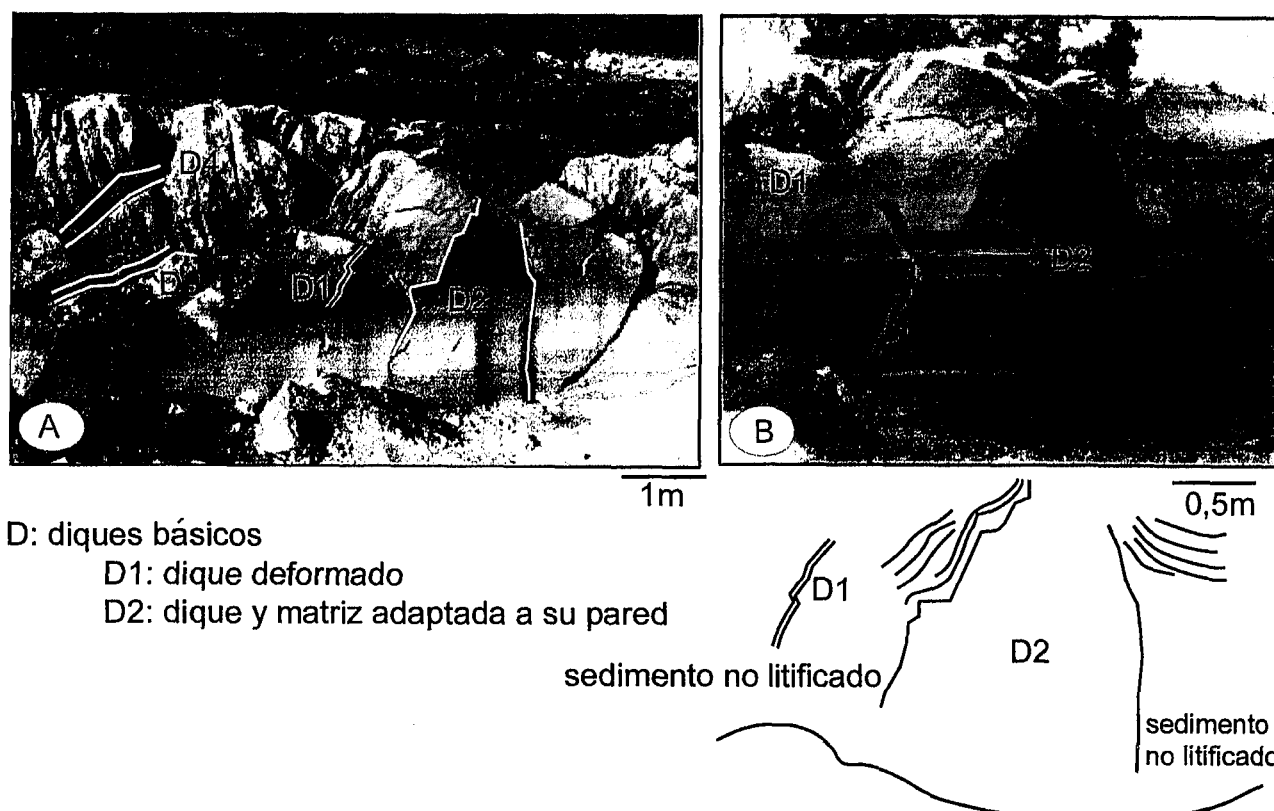
C). Las fracturas presentan un relleno complejo que comprende los tipos (3) a (6) descritos, a los cuales se añaden los siguientes: (7) varias fases de cementos fibrosos (250-500  $\mu\text{m}$ , Figs. 6B y 6C) prácticamente neomorfizados a pseudoesparita (mayor de 500  $\mu\text{m}$ ), y (8-9) una matriz micrítica correspondiente al material no litificado de los montículos (Figs. 6B y D), una brecha de colapso constituida por bloques litificados de los montículos y la lutita suprayacente de los montículos (Fig. 6B).

### Episodio E

Se distinguen dos tipos de compactación: mecánica y química. La compactación mecánica es escasa en las facies bioconstruidas del Miembro La Hoya, debido al carácter aislado de los bioclastos en la matriz micrítica. Se observa en la facies de lutitas con nódulos calcáreos, donde los bioclastos presentan una reorientación acompañada por la adaptación de una porción de la matriz circundante. La compactación química se individualiza en el contacto entre materiales de distinta competencia. Los estilolitos paralelos a la estratificación se atribuyen a procesos de compactación por presión litostática. Los materiales insolubles (arcillas y óxidos de hierro) se concentran en las superficies, formando estilolitos y juntas de disolución (*solution seams*; Buxton y Sibley, 1981). La presencia de estas estructuras puede generar la estilolaminación que caracteriza la facies bioconstruida F4, en la que la lutita se concentra en las superficies estilolíticas (10). Algunos estilolitos y *solution seams* presentan una cementación interna compuesta por calcita, dolomita y lutita roja (Fig. 6F).

### Episodios F y G

Se han localizado varios diques porfídicos básicos (IGME, 1983) en la cantera A<sub>1A</sub> (Figs. 3 y 7), cuya anchura varía entre 5 cm y 2,5 m. El sedimento situado en el primer centímetro de contacto con las paredes de los diques está metamorfizado, provocando una transformación y recrystalización local de la lutita y dolomita incluidas en los estilolitos (11). Localmente, los diques han sufrido una deformación posterior produciendo estructuras de estrangulamiento (*boudinage*; Fig. 7B) que están afectados, a su vez, por fracturas tardías rellenas por cristales de calcita en mosaico y poiquilítico (tipo de relleno 12) y de dolomita anaranjada (13). Los diques atraviesan los montículos a lo largo de la cantera y afectan indistintamente a los sedimentos litificados de los flancos sur y este. Sin embargo, el complejo bioconstruido del flanco norte de la cantera no estaba completamente litificado, como lo demuestra la adaptación de la matriz de los montículos en forma de pliegues divergentes a las paredes de uno de los diques (Figs. 7A y 7B). Estas observaciones permiten proponer, en este caso concreto, una cronología relativa de intrusión de los diques que afectan a estos montículos, siendo posterior a la litificación del tramo inferior de los montículos (facies F4), pero previa a la litificación definitiva de la parte superior de los montículos (facies F5 superior y F3).



**Figura 7.-** Intrusión de diques porfídicos básicos en la cantera A<sub>1A</sub>: (A) Diques (D1 a D4) con límites contorneados en blanco. (B) Detalle de los diques D1 y D2: D1 corresponde a un dique deformado (*boudinage*), y en D2 se observa el plegamiento y deslizamiento del sedimento a partir de la pared del dique.

### Interpretación de los procesos diagenéticos y de fracturación

#### *Diagénesis precoz y fracturación*

La porosidad primaria (intra e interpartícula) y los estromatactis están rellenos por matriz y cementos fibrosos radiaxiales, lo que indica su saturación original en aguas marinas (Longman, 1980). Este sedimento sufrió procesos de deslizamiento por paleopendientes sinsedimentarias que generaron nuevos tipos de porosidad secundaria por fracturación del sedimento. A pequeña escala, se formaron diques neptúnicos en los flancos del complejo bioconstruido asociados a inestabilidades locales de la pendiente, cuyo relleno por matriz y cementos fibrosos se realizó a través de la circulación de fluidos saturados en agua marina. A gran escala, aparecen fracturas caracterizadas por rellenos complejos con numerosas fases de formación de cristales fibrosos, brechas de colapso y rellenos sinsedimentarios asociados a las últimas fases de crecimiento de los montículos. La abundancia de cristales fibrosos sugiere la circulación de fluidos saturados en agua marina, mientras que los cementos drúsicos y equigranulares parecen indicar la circulación de fluidos meteóricos (Longman, 1980). La porosidad primaria desapareció por neoformación de la calcita generando una textura en mosaico equigranular a drúsico. La matriz micrítica experimentó una recrystalización a mi-

croesparita y localmente pseudoesparita.

Por otra parte, algunos flancos de los montículos han sufrido fenómenos de inestabilidad generando deslizamientos a través de paleopendientes. Éstos han afectado a los materiales del edificio bioconstruido no litificados (facies F3 y F5), aunque incluyeron cavidades de tipo estromatactis, *zebra* y diques neptúnicos. Los procesos de deslizamiento generaron a su vez cavidades secundarias tipo *zebra*. Las superficies erosivas de deslizamiento reconocidas en la cantera A<sub>1B</sub> (Fig. 4) no marcan superficies de contacto entre montículos sino pulsos de inestabilidad. Esta interpretación se apoya en la orientación de las distintas cavidades (geopetales, estromatactis y *zebra*) y en la presencia de estructuras sedimentarias de paleopendiente. La orientación diferencial de las cavidades, indicada por la base plana y el relleno paralelo o inclinado a la estratificación, las estructuras de escape de fluidos y deslizamiento (*slumps* y brechas de pendiente) y las sucesivas superficies erosivas indican la presencia de paleopendientes sobre las que se deslizó un material no litificado.

Otro proceso de fracturación (fase D) se encuentra asociado al nivel de despegue de las estructuras de deslizamiento descritas en los flancos de los montículos, relacionándose con los episodios de inestabilidad que afectaron a los montículos bioconstruidos del Miembro La Hoya. Las brechas de sedimento litificado, incluidas en la parte superior de las fracturas, indican el carácter polifásico de la fracturación que llegó a afectar parcialmente a algunos montículos ya litificados.

### Compactación y cementación tardía

Los montículos estuvieron sometidos a la compactación litostática durante el enterramiento. Se reconocen estructuras originadas por la compactación diferencial en los contactos lutita/caliza, siendo frecuentes los picos estilolíticos paralelos a la estratificación que generan, en algunos casos, facies estilolaminadas (facies F4).

Los procesos diagenéticos tardíos son abundantes y complejos, lo que dificulta el establecimiento de su cronología relativa. Están marcados por la influencia de fluidos de composición variable, favoreciendo la recristalización de la calcita (pseudoesparita) y la precipitación de dolomita, cuarzo y óxidos de hierro. Esta precipitación afecta tanto al sedimento como a los cementos tempranos y a los diques neptúnicos. Una fase generalizada de neomorfismo provocó la recristalización masiva del sedimento a pseudoesparita, lo que determinó en gran medida la desaparición del sedimento micrítico original. La cronología en el crecimiento de los cristales autigénicos de cuarzo es posterior a la fase de neomorfismo, ya que estos cristales aparecen dispersos tanto en el sedimento como en las paredes de las cavidades y en las fracturas.

Los diques porfídicos básicos cortan parte de los episodios diagenéticos descritos previamente (diagénesis precoz y compactación litostática), siendo sin embargo afectados por los procesos de diagénesis tardía. Estos últimos provocaron la deformación de algunos diques, su fracturación y su relleno por cristales de calcita y dolomita.

### Metamorfismo

El emplazamiento de los granitos en el área de Burguillos del Cerro (situada a unos 12 km al SO de las canteras de Alconera) originó un metamorfismo de contacto que transformó localmente las calizas de la Formación Alconera en mármoles (IGME, 1983). No obstante, en el área de estudio solamente los sedimentos y cementos situados en los primeros centímetros cerca de las paredes de los diques porfídicos básicos presentan un metamorfismo de contacto local a escala del Miembro La Hoya.

### Conclusiones

En este trabajo se revisa la evolución sedimentaria y diagenética de los montículos bioconstruidos de las canteras A<sub>1A</sub> y A<sub>1B</sub> de Alconera (Badajoz), de edad Marianiense inferior (Cámbrico Inferior). Durante la sedimentación del Miembro La Hoya el principal complejo bioconstruido se instaló sobre un sustrato mixto, en el que previamente se habían desarrollado algunos intentos de colonización (principalmente por calcimicrobios), episódicamente abortados por la decantación terrígena. A techo del complejo bioconstruido se reconoce una profundización progresiva, reflejada por la aparición de biohermos métricos finalizando con el

hundimiento de este sector de la plataforma y la instalación de una plataforma terrígena, colonizada por una asociación faunística bentónica de mar abierto.

El desarrollo de una carstificación sinsedimentaria y episódica, a techo de los montículos, no se ve confirmado en este trabajo debido a la ausencia de sus rellenos característicos. Algunas de estas estructuras son reinterpretadas como diques neptúnicos. Las estructuras geomorfológicas cársticas que afectan localmente al techo del Miembro La Hoya son tardías (quizá cuaternarias), como fue indicado previamente por Moreno-Eiris (1988).

Las fases de crecimiento observadas en las bioconstrucciones indican la instalación de un edificio bioconstruido sobre un sustrato mixto (siliciclástico-carbonatado), la posterior profundización de este sector de la plataforma y el establecimiento de una plataforma terrígena durante el Marianiense medio-superior, debido probablemente a la coexistencia de procesos tectónicos (asociados a las paleopendientes y a las intrusiones porfídicas básicas) y eustáticos.

Se reconocen tres procesos de fracturación: (1) diques neptúnicos señalados en los flancos del complejo bioconstruido, (2) fracturas s.s. asociadas a paleopendientes de deslizamiento y (3) diques porfídicos básicos. Las fracturas sinsedimentarias, dentro de las que se reconocen los diques neptúnicos, presentan el mismo relleno polifásico compuesto por matriz, cementos calcíticos (fibrosos y drúsicos), dolomita y cuarzo autigénico. Los diques porfídicos básicos intruyeron en el Miembro La Hoya posteriormente a la litificación de su parte inferior, pero previamente a la litificación final de su parte superior en la que la matriz micrítica se adapta a los diques formando pliegues sinsedimentarios. Por último, los estromatactis abundan en la facies F5 y son contemporáneos al edificio bioconstruido masivo en cuyos flancos se desarrollaron las estructuras tipo *zebra*.

### Agradecimientos

Las canteras estudiadas forman parte de un proyecto de conservación sobre el Patrimonio Geológico realizado por la Junta de Extremadura, como Punto de Interés Cultural motivado por la calidad de los afloramientos y la espectacularidad de sus procesos de fracturación. Los autores agradecen las facilidades ofrecidas por la Junta de Extremadura en el estudio de las canteras de Alconera, así como las revisiones realizadas por los Drs. Braga y Elorza, que han permitido mejorar las ideas expresadas en este manuscrito. Este trabajo ha sido cofinanciado por los proyectos PB96-0842 y BTE 2000-1423 del Ministerio de Educación español y una ACP 98-1139 del *Ministère de la Recherche et de l'Enseignement* francés.

### Referencias

- Álvarez, J.J., Rouchy, J.M., Bechstädt, T., Boucot, A., Debrenne, F., Moreno-Eiris, E., Perejón, A. y Vennin, E. (2000): Evaporitic constraints on the southward drifting of the western Gondwana margin during Early Cambrian times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160: 105-122.
- Boulvain, F. (1993): Sédimentologie et diagenèse des

- monticules micritiques «F<sub>21</sub>» du Frasnien de l'Ardenne. En: *Professional papers, Service Géologique de Belgique*, 260: 1-436.
- Bourque, P.A. y Cignac, H. (1983): Sponge-constructed stromatactis mud-mounds, Silurian of Gaspé, Quebec. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53: 521-532.
- Bourque, P.A. y Boulvain, F. (1993): A model for the origin and petrogenesis of the red stromatactis limestones of Paleozoic carbonate mounds. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63: 607-619.
- Bridges, P.H. y Chapman, A. (1988): The anatomy of a deep-water mud-mound complex to the Southwest of the Dinantian platform in Derbyshire, UK. *Sedimentology*, 35: 139-162.
- Buxton, T.M. y Sibley D.F. (1981): Pressure solution features in a shallow buried limestone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 19-26.
- Di Salvo, C.H. (1973): Microbial ecology. En: *Biology and Geology of Coral Reefs* (O.A. James y R. Endean, Eds.), 2: 1-19.
- Fischer, A.G. (1964): The lofer cyclothem on the Alpine Triassic. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 169: 107-149.
- IGME (1983): Mapa Geológico de España 1:50.000. hoja nº 854 (Zafra). Madrid, IGME.
- Lees, A. (1988): Waulsortian "reefs": history of a concept. *Mémoires de l'Institut Géologique de l'Université de Louvain*, 34: 34-35.
- Lees, A. y Miller, J. (1985): Facies variation in Waulsortian buildups; part. 2: Mid Dinantian buildups from Europe and north America. *Geological Journal*, 20: 159-180.
- Liñán, E. (1984): Introducción al problema de la paleogeografía del Cámbrico de Ossa Morena. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 8: 283-314.
- Liñán, E. y Perejón, A. (1981): El Cámbrico inferior de la "Unidad de Alconera", Badajoz (SO de España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, 79: 125-148.
- Liñán, E. y Quesada, C. (1990): Part V. Ossa-Morena Zone. 2. Stratigraphy. 2.2. Rift phase (Cambrian). En: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (R. D. Dallmeyer y E. Martínez-García, Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 259-266.
- Logan, B.W. y Semeniuk, V. (1976): Dynamic metamorphism: processes and products in Devonian carbonate rocks, Canning Basin, western Australia. *Geological Society of Australia, Special Publication*, 6: 1-138.
- Longman, N.W. (1980): Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geology*, 64: 461-487.
- Monty, C.L.V. (1995): The rise and nature of carbonate mud mounds: an introductory actualistic approach. En: *Carbonate Mud-Mounds. Their Origin and Evolution* (C.L.V. Monty, D.W.J. Bossence, P.H. Bridges y B.R. Pratt, Eds.), Special Publication of the international Association of Sedimentologists, 23: 11-48.
- Monty, C.L.V. y Van Lear, P. (1988): The Upper Devonian mud mounds from the southwestern Dinant synclinorium. En: *9th IAS European Regional Meeting on Sedimentology, Excursion Guidebook*, p. 157-176.
- Moreno-Eiris, E. (1988): Los montículos arrecifales de algas y arqueociatos del Cámbrico Inferior de Sierra Morena. *Publicaciones Especiales del Boletín Geológico y Minero*, 127 p.
- Moreno-Eiris, E.; Perejón, A.; Rodríguez, S. y Falces, S. (1995): Paleozoic cnidaria and porifera from Sierra Morena. Field Trip D. En: *VII International Symposium on Fossil Cnidaria and Porifera* (A. Perejón, Ed.), Universidad Complutense, Madrid, 68 p.
- Perejón, A. (1973): Contribución al conocimiento de los arqueociátidos de los yacimientos de Alconera (Badajoz). *Estudios Geológicos*, 29: 179-206.
- Perejón, A. (1986): Bioestratigrafía de los arqueociatos en España. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 9(1984): 213-316.
- Playford, P.E. (1984): Platform-margin and marginal-slope relationships in Devonian reef complexes of the Canning Basin, Australia. *Petroleum Exploration Society, Australian Symposium*, 190-214.
- Pratt, B.R. (1982): Stromatolitic framework of carbonate mud-mounds. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52: 1203-1227.
- Ross, R. J., Jaanusson, V. y Friedman, I. (1975): Lithology and origin of Middle Ordovician calcareous mudmounds at Meiklejohn Peak, southern Nevada. *Geological Survey, Professional Paper*, 871: 1-48.
- Simon, W. (1939): Lithogenesis kambrischer der Sierra Morena (Spanien). *Senckenbergiana*, 2: 297-31.

Manuscrito recibido el 23 de septiembre de 2000

Aceptado el manuscrito revisado el 16 de febrero de 2001